

КОЛЬЦОВА Олександра

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку
Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут радіо і телебачення»

<https://orcid.org/0009-0000-8235-7713>

e-mail: otdel.13r@gmail.com

ХІВРЕНКО Руслан

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

<https://orcid.org/0009-0006-2265-5341>

e-mail: ruslan_energomir@ukr.net

СУБ'ЄКТИВНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ЧАСТОТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СЛУХУ НА ВИМІРЮВАННЯ ГУЧНОСТІ ЗВУЧАННЯ АУДІОКОНТЕНТУ

У статті наведено результати розширеного експериментального дослідження (на основі суб'єктивно-статистичних експертиз) впливу частотних властивостей слуху на сприйняття гучності аудіоконтенту різних жанрів. Дослідження є продовженням роботи щодо доцільності модифікації другого ступеня попередньої фільтрації в алгоритмі вимірювання гучності, регламентованому в Рекомендації ITU-R BS.1770-5. На відміну від попереднього експерименту, в якому приймали участь 20 слухачів, у даній роботі кількість учасників збільшено до 50 осіб, що дозволило підвищити статистичну достовірність результатів і звужити довірчі інтервали. Суб'єктивно-статистичну оцінку помітності змін гучності проведено при корекції рівня сигналу в області частот вище 1 кГц відповідно до кривої рівної гучності 60 фон (Флетчера–Мансона), психофотометричної кривої, та В-кривої. Помітність зміни гучності перевищує, або близька до 50% у випадках використання кривої рівної гучності 60 фон та психофотометричної кривої, що свідчить про значущість частотної корекції у діапазоні вище 1 кГц. Отримані результати підтверджують висновок про доцільність урахування частотної залежності чутливості слуху у середньо- та височастотній області звукового діапазону при вдосконаленні алгоритмів об'єктивного вимірювання гучності програм мовлення.

Ключові слова: гучність звучання, аудіоконтент, частотне зважування, психофотометрична крива, криві рівної гучності, суб'єктивна експертиза.

KOLTSOVA Oleksandra

State University of Intellectual Technologies and Communications
State Enterprise “Ukrainian Scientific Research Institute of Radio and Television”

KHIVRENKO Ruslan

State University of Intellectual Technologies and Communications

SUBJECTIVE ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF AUDITORY FREQUENCY CHARACTERISTICS ON THE MEASUREMENT OF AUDIOCONTENT LOUDNESS

Research work on the improvement of algorithm of sound programs loudness is of great importance for modern broadcasting. The article presents the results of an extended experimental study (based on subjective statistical evaluations) of the influence of auditory frequency characteristics on the perception of audio content loudness of various genres. The study is a continuation of previous work concerning the feasibility of modifying the second stage of pre-filtering in the loudness measurement algorithm specified in Recommendation ITU-R BS.1770-5.

In contrast to the previous stage of experiment, which involved 20 listeners, in the present study the number of participants are increased to 50, thereby improving the statistical reliability of the results and narrowing the confidence intervals, which are calculated in this article. The subjective statistical assessment of the perceptibility of loudness changes was carried out while adjusting the signal level in the frequency range above 1 kHz according to the 60-phon equal-loudness contour (Fletcher–Munson), the psychometric curve and the B-weighting curve. The assessment was fulfilled for different types of audiocontent – speech, both male and female, as well as music. The perceptibility of loudness changes exceeds or is close to 50% when using the 60-phon equal-loudness contour and the psychometric curve, thus indicating the significance of frequency correction in the range above 1 kHz.

The obtained results confirm the conclusion that it is advisable to take into account the frequency dependence of auditory sensitivity in the mid- and high-frequency parts of the sound frequency band when improving algorithms for the objective measurement of loudness of broadcast programs.

Keywords: loudness, audio content, frequency weighting, psychometric curve, equal-loudness contours, subjective evaluation.

Стаття надійшла до редакції / Received 30.04.2026

Прийнята до друку / Accepted 30.06.2026

Опубліковано / Published 10.09.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© КОЛЬЦОВА Олександра, ХІВРЕНКО Руслан

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ

ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Одним з актуальних напрямків сучасних досліджень у звукотехніці є удосконалення алгоритмів вимірювання гучності. У Рекомендації MCE-R BS.1770-5 [1] зазначають, що для слухачів аудіо програм

бажаним було б, щоб суб'єктивна гучність звукових програм була єдиною для різних джерел та типів програм, тому для регулювання гучності важливо використовувати єдиний рекомендований алгоритм оцінки гучності. Рекомендація [1] містить опис алгоритму об'єктивного вимірювання гучності у звуковому каналі, проте наголошується можливість подальшого удосконалення цього алгоритму для збільшення ефективності вимірювання.

У чинній версії алгоритму вимірювання гучності, визначеного у Рекомендації МСЕ-R BS.1770-5 [1], застосовується двоступенева попередня фільтрація звукового сигналу. Другий ступінь реалізує зважування RLB (Revised Low-Frequency B-Curve) для врахування властивостей суб'єктивного сприйняття людиною гучності звучання на різних частотах. Метод зважування застосовано у низькочастотній області, але не враховано зміни чутливості слуху в області середніх і високих частот.

В результаті порівняння характеристики зважувального фільтра, наведеної у [1] для використання в алгоритмі об'єктивного вимірювання гучності, та відомих результатів щодо опису чутливості слуху людини в звуковому діапазоні у вигляді відповідних кривих, виникає запитання щодо врахування чутливості слуху на верхніх частотах звукового діапазону.

У роботі [2] описано експериментальне дослідження щодо помітності зміни гучності звучання аудіоконтенту при зміні рівня досліджуваного звукового сигналу на високих частотах та його результати. Це дослідження проводилося в рамках дослідницької роботи, метою якої є отримання відповіді на питання – якою саме має бути характеристика зважувального фільтра другого ступеня у вимірювачах гучності на частотах вище 1 кГц.

В роботі порівнювалися результати щодо помітності зміни гучності звучання аудіоконтенту за умови зміни рівня сигналу на частотах вище 1 кГц згідно частотної характеристики слуху, отриманої на основі кривої рівної гучності для 60 фон, та психофотричної кривої, яка використовувалася зокрема для оцінки параметрів каналів радіомовлення [2]. Використовувалися мовний та два типи музичних сигналів, надані для прослуховування 20 слухачам.

Під час порівняння між собою результатів для двох використаних методів обробки сигналу було виявлено, що помітність змін серед учасників експерименту за показником гучності складає більше 50% в обох випадках [2].

Але через те, що розраховану точність отриманих результатів для деяких фрагментів не можна вважати достатньою, виникла необхідність проведення подальших досліджень. Насамперед, потрібно збільшити кількість учасників експерименту для визначення помітності зміни гучності. Також слід включити до експерименту розгляд В-кривої зважування [2, 3], як такої, на яку опиралися розробники алгоритму у [1] для зважування нижніх частот звукового діапазону.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

З урахуванням викладеного вище було проведено наступний етап дослідження з метою уточнення результатів визначення помітності змін гучності при зміні рівня сигналу звукового мовлення в діапазоні середніх та високих звукових частот.

Порівняно з першим етапом було збільшено кількість учасників, яким пропонувалося прослухати і порівняти оригінальні аудіофрагменти та фрагменти, в яких були зміни рівня у частотній області. Ці зміни виконувалися в області середніх та високих частот шляхом проведення певних типів обробки сигналу – відповідно до: частотної характеристики слуху, отриманої на основі кривої рівної гучності із рівнем 60 фон; психофотричної кривої та В-кривої. На основі результатів експерименту ми зможемо зробити висновки щодо необхідності врахування чутливості слуху на високих частотах під час вимірювання гучності сигналів радіомовлення та звукового супроводу телебачення.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Порядок проведення експерименту.

Як і на першому етапі досліджень, у якості тестового звукового матеріалу використовувалися два музичні фрагменти (джазової та рок-музики) і два фрагменти дикторської мови (чоловічий голос, інформаційне повідомлення та жіночий голос, аудіокнига). Гучність звучання первинних фрагментів порівнювалася із гучністю відповідно змінених фрагментів в області середніх та високих звукових частот. Зміни виконувалися відповідно до психофотричної кривої, частотної характеристики, відповідної рівню гучності 60 фон (рис. 1) [2] та В-кривої (рис. 2). Частотну характеристику В-кривої представлено виразом [3]:

$$R_B(f) = 20 \lg \left(\frac{1,01639 \cdot f^2}{\sqrt{(f^2 + 158,5^2) \cdot (f^2 + 158500^2)}} \right), \text{ дБ} \quad (1)$$

де:

$R_B(f)$ – корекція (зважування) в децибелах, що застосовується до вимірюваного рівня звуку на частоті f ;

f – вимірювана частота в Герцах (Гц);

1,01639 – коефіцієнт нормалізації, яким забезпечено, що корекція на 1000 Гц дорівнює 0 дБ;

158,5 Гц та 158500 Гц – значення частот зрізу (кутовими частотами) зважувального фільтра.

Графіки, що представляють яким чином під час експерименту змінювався рівень сигналу на вищих частотах відносно 1 кГц, надані на рис. 1 і 2. Корегування рівня звукових сигналів на відповідних частотах виконувалося за допомогою редактора Sound Forge Pro 11.0.

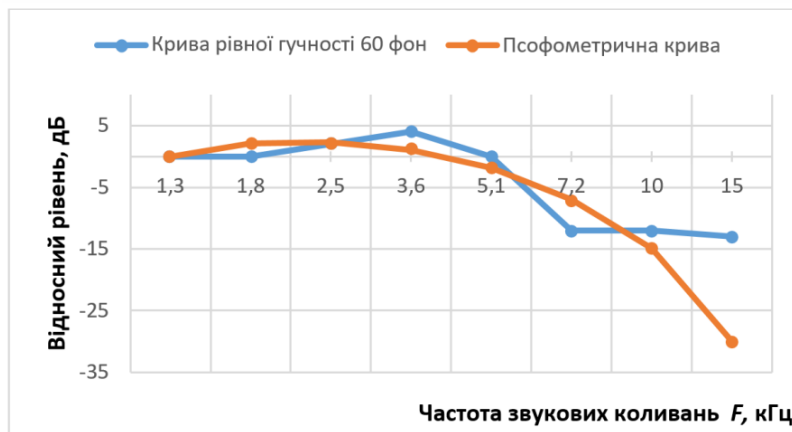


Рис. 1. Графік частотної залежності чутливості слуху в області середніх та високих частот відповідно до кривої рівної гучності 60 фон та псофометричної кривої

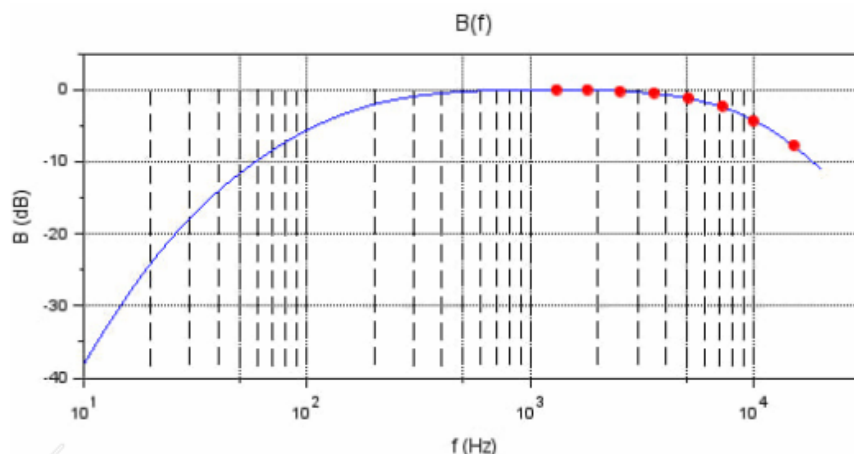


Рис. 2. В-крива зважування для вимірювання рівня шуму

Кількість n слухачів віком від 18 до 50 років, запрошених до участі в експерименті, та результати помітності зміни гучності для різних фрагментів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Результати щодо помітності зміни гучності звукових сигналів різних жанрів за зміни рівня сигналу в області середніх та верхніх звукових частот

Тип звукового сигналу	Частотне зважування					
	Відповідно до кривої рівної гучності 60 фон		Відповідно до псофометричної кривої		Відповідно до В - кривої	
	Помітність зміни гучності, %	Загальна кількість слухачів n	Помітність зміни гучності, %	Загальна кількість слухачів n	Помітність зміни гучності, %	Загальна кількість слухачів n
Мова диктора, чоловічий голос	57%	50	47%	50	34,5%	30
Аудіокнига, жіночий голос	55%	50	61%	75	51%	41
Джаз	86%	50	51%	50	31%	30
Рок-музика	73%	50	41%	50	34,4%	30

Математичне трактування результатів експерименту

Як і на попередньому етапі досліджень здійснювалося математичне трактування отриманих результатів суб'єктивно-статистичної експертизи у вигляді визначення довірчих інтервалів. Методику їх визначення досить докладно викладено у роботі [2] на основі міжнародних рекомендацій за умови, що закон розподілу оцінок помітності зміни гучності при певному змінненні рівня аудіосигналу нормальний.

Під час проведення експертиз із різними величинами змінення рівня сигналу істинні значення помітності, або, що точніше, імовірності помітити дану величину змінення, набуватимуть усіх значень від 0 до 1 (від 0% до 100%) залежно від величини змінення на відповідних частотах. Маючи ці дані і знаючи, скільки експертів брало участь в експерименті з визначення помітності змінення, можна побудувати інтервал, у який із заданою ймовірністю потраплятимуть значення помітності цього самого змінення за умови повторення експерименту. Таким чином, цей інтервал визначить із заданою вірогідністю точність отриманих результатів.

Для визначення довірчого інтервалу використовувалися дані з табл. 1 щодо помітності зміни гучності і кількості слухачів, що брали участь в експерименті. Згідно описаної методики за отриманим значенням помітності для відповідної кривої зважування визначаємо величину $S_{\bar{x}}$, яка в теоретичному розподілі відповідає дисперсії помітності

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

де

$$S = \frac{p_i(1-p_i)n}{n-1}, \quad (3)$$

p_i – імовірність помітності слухачем змінення гучності звучання при певному змінненні рівня аудіо сигналу.

Оскільки $n \gg 1$, то можна вважати, що $\frac{n}{n-1} \approx 1$ і тоді $S = \sqrt{p_i(1-p_i)}$.

Нормоване відхилення величини помітності буде визначатися як:

$$t = \frac{p_i - p}{S_{\bar{x}}}. \quad (4)$$

де p є істинне значення помітності змінення гучності, яке ми шукаємо.

У роботі [2] нормоване відхилення визначалося для довірчої імовірності $\alpha = 0,9$, тобто із імовірністю 0,9 значення t знаходитиметься в інтервалі $-t_\alpha < t < +t_\alpha$:

$$\bar{p}(-t_\alpha < t < +t_\alpha) = \int_{-t_\alpha}^{t_\alpha} S(t, k) dt = 2 \int_0^{t_\alpha} S(t, k) dt = \alpha, \quad (5)$$

де $S(t, k)$ – функція розподілу величини t , $k = n - 1$ [2].

Таблицю значень t_α , визначених у (5), наведено у довідковій літературі [4], за якою по заданій величині α знаходиться відповідне значення t .

З урахуванням виразу (4)

$$-t_\alpha < \frac{p_i - p}{S_{\bar{x}}} < t_\alpha, \quad (6)$$

відповідно

$$p_i - t_\alpha S_{\bar{x}} < p < p_i + t_\alpha S_{\bar{x}}. \quad (7)$$

Справжня величина помітності даного змінення гучності з вірогідністю α лежить у довірчому інтервалі

$$(p_i - \varepsilon) < p < (p_i + \varepsilon), \quad (8)$$

де $\varepsilon = t_\alpha S_{\bar{x}}$ – точність наближеної рівності значення p_i до істинного значення p [2].

Обчислення довірчих інтервалів виконаємо так само як і в роботі [2], за $\alpha = 0,9$. Результати обчислень довірчих інтервалів за показниками помітності для кожного обробленого фрагменту аудіоматеріалу зведемо до табл. 2.

Відповідно до описаної методики були оброблені результати проведених експертиз щодо дослідження помітності змінення гучності звучання за умови змінень рівня звукових сигналів різних жанрів в області середніх та високих частот.

Таблиця 2

Результати обчислення довірчого інтервалу за показником помітності зміни гучності для оброблених звукових фрагментів

Змінення рівня сигналу згідно:	Помітність змінення гучності p_i	Кількість експерто-показань n	$S = \sqrt{p_i(1-p_i)}$	Дисперсія $S_x = S/\sqrt{n}$	Нормоване відхилення t_a	Точність $\epsilon = t_a S_x$
Джазова музика						
Крива, відповідна 60 фон	0,86	50	0,35	0,05	1,68	0,084
Псофометрична крива	0,51	50	0,5	0,07	1,68	0,118
В - крива	0,31	30	0,46	0,084	1,7	0,143
Рок-музика						
Крива, відповідна 60 фон	0,73	50	0,44	0,063	1,68	0,106
Псофометрична крива	0,41	50	0,49	0,07	1,68	0,118
В - крива	0,34	30	0,474	0,086	1,7	0,146
Мова диктора						
Крива, відповідна 60 фон	0,57	50	0,495	0,07	1,68	0,118
Псофометрична крива	0,47	50	0,5	0,071	1,68	0,119
В - крива	0,35	30	0,477	0,087	1,7	0,148
Аудіокнига (жіночий голос)						
Крива, відповідна 60 фон	0,55	50	0,5	0,071	1,68	0,119
Псофометрична крива	0,61	75	0,488	0,056	1,67	0,094
В - крива	0,51	41	0,5	0,078	1,68	0,131

Розрахунки довірчих інтервалів показали, що точність результатів визначення помітної зміни гучності звучання за умови, що довірна імовірність $\alpha = 0,9$, є такою:

1) Під час зміни рівня звукового сигналу відповідно до частотної характеристики слуху, вираженої кривою рівної гучності 60 фон:

- джазова музика $\pm 8,4$ %;
- рок-музика $\pm 10,6$ %;
- мова диктора $\pm 11,8$ %.
- аудіокнига (жіночий голос) $\pm 11,9$ %.

2) Під час зміни рівня звукового сигналу відповідно до псофометричної кривої:

- джазова музика $\pm 11,8$ %;
- рок-музика $\pm 11,8$ %;
- мова диктора $\pm 11,9$ %.
- аудіокнига (жіночий голос) $\pm 9,4$ %.

3) Під час зміни рівня звукового сигналу відповідно до В - кривої

- джазова музика $\pm 14,3$ %;
- рок-музика $\pm 14,6$ %;
- мова диктора $\pm 14,8$ %.
- аудіокнига (жіночий голос) $\pm 13,1$ %.

У порівнянні із першим етапом експерименту [2] можна зазначити, що збільшення кількості учасників експерименту дозволило збільшити точність отриманих результатів щодо помітності зміни гучності звучання аудіо контенту різних жанрів.

З огляду на результати експерименту, надані в табл. 1 і 2, можна відзначити, що найбільш помітною для слухачів була зміна гучності звучання в результаті зважування згідно кривої чутливості слуху, отриманої на основі кривої рівної гучності 60 фон. Як відомо, криві рівної гучності, зокрема і наведені в роботі [2], було отримано шляхом суб'єктивного оцінювання сприйняття звуку людиною. Тому при побудові відповідного графіка на рис. 1 за кривими рівної гучності визначалася різниця між рівнями звукового сигналу на досліджуваній частоті і частоті 1 кГц, на основі чого було зроблено висновок про відносну чутливість слуху в діапазоні середніх та високих частот. Проте для подальших досліджень знадобиться вираз, що дозволяє апроксимувати криву чутливості слуху, отриману на основі кривої рівної гучності 60 фон.

Результат апроксимації кривої рівної гучності 60 фон може бути представлено виразом:

$$L_{60}(f) = 79,94 + 9,34 \lg(f) - 19,09(\lg(f))^2 + 3,79(\lg(f))^3 \quad (9)$$

де $L_{60}(f)$ – рівень звукового тиску, дБ,

f – частота, Гц.

Для подальших досліджень на основі виразу (9) має бути виведена вагова функція, що враховує відносну чутливість слуху людини.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

За підсумками проведення двох етапів суб'єктивно-статистичного дослідження можна відзначити наступне.

Збільшення кількості залучених експертів дозволило зменшити довірчі інтервали та підвищити статистичну достовірність результатів. Більша кількість досліджуваних звукових фрагментів також надає можливість більш глибокого аналізу особливостей сприйняття гучності аудіоконтенту програм мовлення. Отримано, що помітність зміни гучності перевищує 50% у випадках застосування зважування відповідно до кривої чутливості слуху, отриманої на основі кривої рівної гучності 60 фон, та застосування психофотометричної кривої для зважування музичного сигналу (рок-музика) та мовного (аудіокнига, жіночий голос), що свідчить про значущість частотної корекції у діапазоні вище 1 кГц. Важливо відзначити, що застосування В-кривої для зважування звукових сигналів у верхній частині звукового діапазону показало дуже слабку помітність зміни гучності – менше 50%.

Помітність зміни гучності після корекції більше помітна на музичних сигналах, ніж на мовних (табл. 2).

Отримані результати обґрунтовують доцільність подальших досліджень щодо модифікації частотної характеристики другого ступеня попередньої фільтрації у вимірювачах гучності. При такій модифікації варто звернути увагу на результати, отримані для частотної характеристики слуху, отриманої на основі кривої рівної гучності для 60 фон.

Наступним етапом роботи може бути експериментальне моделювання альтернативної частотної характеристики зважування та її порівняння з базовим алгоритмом, регламентованим ITU-R.

Література

1. Recommendation ITU-R BS.1770-5 (11/2023). Algorithms to measure audio programme loudness and true-peak audio level. Electronic Publication. Geneva, 2023. Режим доступу: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1770-5-202311-I!!PDF-E.pdf.
2. КОЛЬЦОВА, О., ХІВРЕНКО, Р., & ГРАЧОВ, А. (2024). ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТОТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СЛУХУ В ПРОЦЕСІ ВИМІРЮВАННЯ ГУЧНОСТІ ЗВУЧАННЯ АУДІОКОНТЕНТУ. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 341(5), 431-437. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-63>
3. Frequency weighting equations. [Електронний ресурс]: Cross Spectrum. 2004. Режим доступу: <https://www.cross-spectrum.com/audio/weighting.html>
4. Ткач Є. І., Загальна теорія статистики: підручник [для студ. вищ. навч. закл.] / Ткач Є. І., Сторожук В. П. – [3-тє вид.] – К.: Центр учбової літератури, 2009. – 442 с.

References

1. Recommendation ITU-R BS.1770-5 (11/2023). Algorithms to measure audio programme loudness and true-peak audio level. Electronic Publication. Geneva, 2023. Rezhim dostupu: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1770-5-202311-I!!PDF-E.pdf
2. Koltsova, O., Khivrenko, R., & Hrachov, A. (2024). Doslidzhennia vplyvu chastotnykh vlastyvostei slukhu v protsesi vymiryuvannia huchnosti zvuchannia audiokontentu. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 341(5), 431–437. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-63>
3. Frequency weighting equations. [Електронний ресурс]: Cross Spectrum. 2004. Режим доступу: <https://www.cross-spectrum.com/audio/weighting.html>
4. Tkach, Ye. I. Zahalna teoriia statystyky: pidruchnyk [dlia stud. vyshch. navch. zakl.] / Tkach, Ye. I., Storozhuk, V. P. – [3-tie vyd.] – K.: Tsentr uchbovoi literatury, 2009. – 442 s.